

Performansi Sistem Refrigerasi *Cascade* Menggunakan MC22 Dan R407F Sebagai Alternatif Refrigeran Ramah Lingkungan Dengan Variasi Laju Pengeluaran Kalor Kondensor *High Stage*

Agung Dwi Perkasa, Ary Bachtiar Khrisna Putra

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: arybach@me.its.ac.id

Abstrak—Dewasa ini, pengaruh pemakaian refrigeran tidak hanya masalah potensi kerusakan ozon (ODP) dan efek pemanasan permukaan bumi (GWP), tetapi juga mencakup pada masalah efisiensi energi. Bersamaan dengan faktor ODP dan GWP, diupayakan alternatif pengganti refrigeran halo-karbon yang dapat meningkatkan penghematan energi. Data penelitian kali ini didapatkan dengan melakukan pengujian pada peralatan sistem refrigerasi di laboratorium pendingin dan pengkondisian udara, dengan menguji performa sistem refrigerasi *cascade* menggunakan *intermediate* tipe PHE yang menggunakan refrigeran MC22 di *high stage* dan R407F di *low stage*. Variasi yang dilakukan adalah laju pengeluaran kalor pada kondensor dengan mengatur kecepatan aliran udara fan yang melalui kondensor yaitu mulai dari kecepatan 1, 2, 3, 4, 5. Hasil yang didapatkan dari performansi studi eksperimen ini adalah pada variasi kecepatan fan tertinggi 2,8 m/s, *coefficient of performance* sistem sebesar 1.70, kapasitas refrigerasi sebesar 1,34 kW, *heat rejection ratio* sistem sebesar 1.63, temperatur evaporator LS sebesar -42.48 °C, dan temperatur kabin terendah sebesar -35.22 °C, dan nilai *effectiveness* alat penukar kalor tipe *plate heat exchanger* sebesar 95.93%.

Kata Kunci— Sistem *Cascade*, *Plate Heat Exchanger*, Kapasitas Refrigerasi, *effectiveness*, COP

I. PENDAHULUAN

P *ROSES* penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi dan memindahkan kalor tersebut ke suatu medium tertentu yang memiliki temperatur lebih rendah serta menjaga kondisi tersebut sesuai dengan yang dibutuhkan disebut sebagai proses refrigerasi. Telah diketahui bahwa pemborosan energi dengan seiring meningkatnya pembangunan pembangkit tenaga listrik untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik, peningkatan pemakaian bahan bakar minyak, secara signifikan memberikan kontribusi pada peningkatan pemanasan bumi melalui efek rumah kaca. Kepedulian masyarakat internasional akan hal tersebut diatas, diwujudkan dalam bentuk mengkampanyekan bahwa ODP, GWP dan efisiensi energi merupakan kesatuan paket yang harus diperhatikan dalam pemilihan refrigeran pada mesin pendingin. Seiring dengan perkembangan zaman yang semakin maju dan modern, banyak diciptakan alat-alat yang canggih untuk menunjang kehidupan manusia. Mesin-mesin pendingin adalah salah satu alat yang sangat berkembang seiring dengan kemajuan teknologi. Mesin refrigerasi pada saat ini

telah menjadi kebutuhan dasar bagi sebagian besar masyarakat baik di perkotaan maupun di pedesaan karena fungsinya yang sangat penting. Penggunaan mesin refrigerasi ini harus diperhatikan dalam pemakaian zat yang mengalir dalam mesin pendingin yang disebut dengan refrigeran, karena fungsi dari refrigeran itu sendiri adalah sebagai penyerap panas dari benda atau udara yang diinginkan kemudian membuangnya ke lingkungan. Pemilihan refrigeran yang baik untuk sebuah alat pendingin akan mempengaruhi berkurangnya kerusakan lapisan ozon yang ada di bumi ini.

Penggunaan teknik pendinginan dimana temperatur sedikit dibawah 0°C, memungkinkan bahan obat-obatan dapat disimpan dalam jangka waktu yang lama. Oleh karena itu mesin pendingin yang dapat menghasilkan temperatur hingga dibawah 0°C salah satunya adalah sistem pendingin *cascade*. Dengan menggunakan sistem ini maka kalor pada kondensor *low-stage* dapat didinginkan oleh *evaporator high-stage* sehingga temperatur evaporator yang dapat dicapai pada *low-stage* lebih rendah. Pada studi eksperimental sistem refrigerasi *cascade* terdahulu, yaitu tugas akhir dari Faberto^[1], menggunakan *intermediate* tipe *concentric tube* sebagai alat penukar panas antara *low-stage* dengan *high-stage*. *Intermediate* tipe konsentris ini hanya menghasilkan laju perpindahan panas antara permukaan dalam pipa konsentris sebagai jalur laju dari refrigeran *low-stage* dengan permukaan luar pipa konsentris sebagai jalur laju dari refrigeran *high-stage*. Laju perpindahan panas dianggap masih kurang pada *intermediate* tipe konsentris ini, sedangkan penelitian Ismu cakra gumilar^[2] pada tahun 2012 melakukan studi eksperimental dengan variasi laju pelepasan kalor pada kondensor *high stage* terhadap unjuk kerja sistem refrigerasi *cascade*, didapatkan hubungan grafik daya kompresor *cascade* dengan fungsi laju pelepasan kalor kondensor *high stage*. Hasil studi eksperimental yang didapatkan dari penelitian ismu cakra gumilar^[2] nilai daya kompresor naik seiring dengan naiknya laju pelepasan kalor pada kondensor *high stage*. Ketika laju pelepasan kalor pada kondensor *high stage* semakin naik, maka menyebabkan suhu kondensor yang turun. Suhu kondensor yang turun menyebabkan proses kondensasi pada kondensor semakin baik, sehingga semakin banyak refrigeran yang ini menyebabkan laju alir masa yang semakin meningkat yang akan menyebabkan daya kompresor akan semakin meningkat.

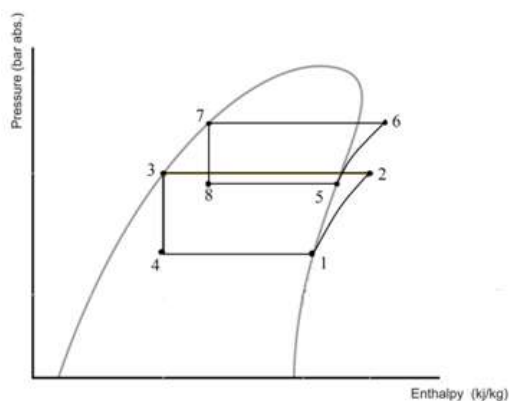
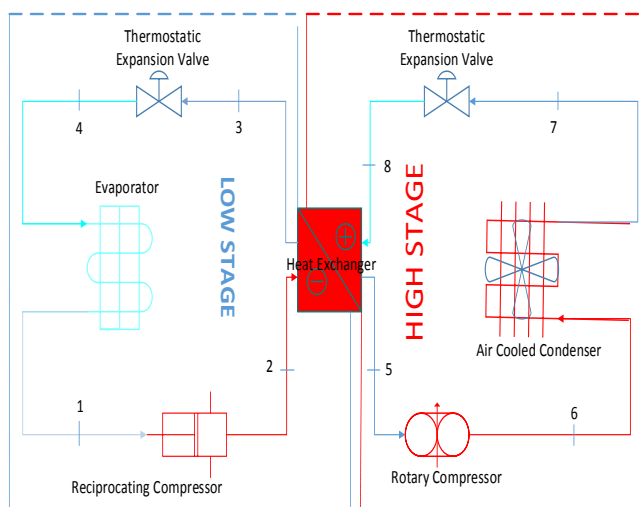
Sehingga pada eksperimen kali ini komponen tersebut diganti dengan tipe *plate heat exchanger* (PHE) yang mempunyai laju perpindahan panas lebih baik dibandingkan dengan tipe konsentris. Dengan demikian, diharapkan temperatur yang dihasilkan pada evaporator *low-stage* jauh

lebih rendah dari penelitian sebelumnya. Sistem refrigerasi *cascade* pada studi eksperimental ini sudah mengalami banyak perubahan pada alat penukar panas dan konstruksinya. Sering berubah-ubahnya temperatur lingkungan juga mempengaruhi performa dari kondensor pada *high-stage*. Sehingga pada studi eksperimental kali ini dilakukan variasi laju kecepatan fan kondensor *high stage* dimana hal tersebut dilakukan untuk mengetahui performa dari sistem refrigerasi *cascade* dengan menggunakan refrigeran yang ramah lingkungan dan menggunakan katup ekspansi tipe TXV (*Thermostat Expansion Valve*) agar didapatkan performa yang lebih baik.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Sistem Refrigerasi Cascade

Sistem refrigerasi kompresi uap bertingkat merupakan sistem kompresi uap lanjutan yang memiliki dua atau lebih jumlah kompresor sebagai komponen yang dapat memompa dan mensirkulasikan refrigeran dan menaikkan tekanannya. Sistem pendinginan *cascade* sering digunakan untuk aplikasi industri pendingin yang menggabungkan dua atau lebih siklus pendingin secara seri. Hal ini dilakukan untuk memperoleh temperatur rendah, yang tidak dapat dicapai dengan siklus refrigerasi uap standar. Pada prinsipnya efek refrigerasi yang dihasilkan oleh evaporator HS dimanfaatkan untuk menyerap kalor yang dilepas oleh kondensor LS, sehingga dihasilkan temperatur yang sangat rendah pada evaporator LS.



Gambar 1 Skema sistem refrigerasi *cascade* dan P-h Diagram sistem refrigerasi *cascade*

Sebagaimana yang diketahui pada empat komponen utama sistem refrigerasi, kompresi uap standar tidak akan dapat bekerja dengan sesuai fungsinya jika salah satu komponen tersebut tidak ada atau tidak digunakan. Komponen utama tersebut tidak beda jauh dengan sistem refrigerasi *cascade* dimana terdapat lima komponen utama yaitu empat komponen utama sistem refrigerasi kompresi uap standar dan adanya *intermediate* sebagai alat penghubung untuk mentransfer energi kalor dari *high stage* ke *low stage*. Dalam sistem *cascade*, jenis refrigeran untuk siklus *high stage* dan siklus tekanan *low stage* tidak perlu sama sehingga pemilihan refrigeran akan bisa lebih leluasa.

B. Komponen Sistem Refrigerasi Cascade

Adapun komponen-komponen utama secara umum agar sistem refrigerasi *cascade* dapat bekerja dengan baik. Komponennya adalah :

1. Kompresor

Kompresor merupakan unit tenaga dalam sistem pendingin. Dimana fungsi dari kompresor itu sendiri adalah menekan bahan pendingin refrigeran agar tetap bersirkulasi di dalam sistem pendingin. Unjuk kerja nyata kompresor dapat diketahui dari daya yang diberikan terhadap kompresor dengan rumus:

$$W_c = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \quad (1)$$

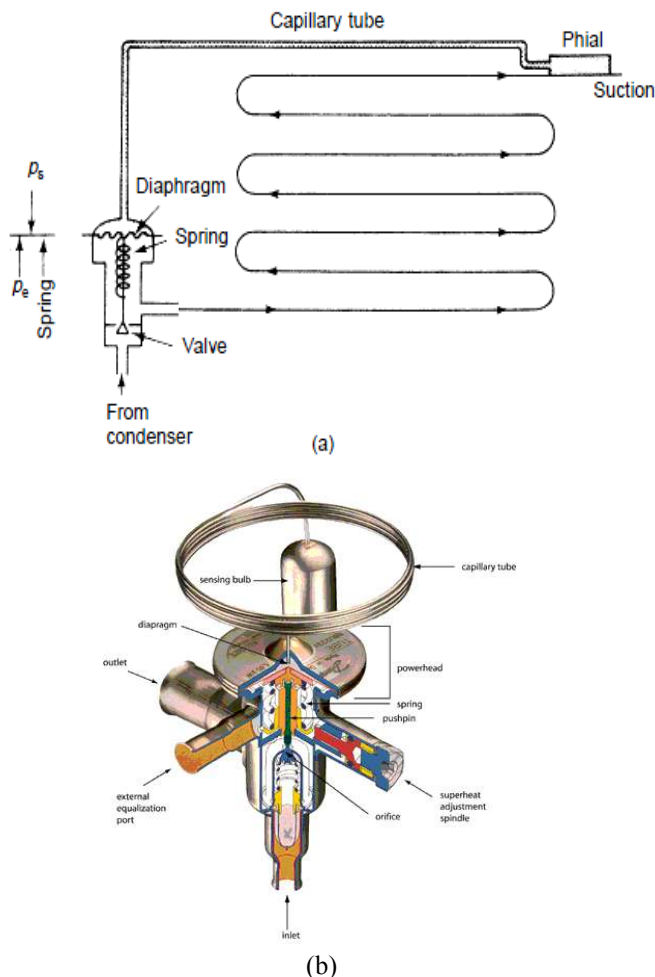
2. Kondensor

Kondensor merupakan salah satu komponen yang berada pada daerah tekanan tinggi dari sistem pendingin. Kondensor itu sendiri berfungsi sebagai alat pembuangan kalor (*heat rejection*) dari dalam sistem ke luar sistem. Pada saat refrigeran memasuki kondensor maka uap refrigeran tersebut akan mengembun dan berubah fasa dari uap menjadi cair (terkondensasi). Alat penukar panas yang digunakan sebagai kondensor pada *high stage* tipenya *compact heat exchanger*.

$$Q_{cond} = \dot{m} \times (h_{in} - h_{out}) = \dot{m}_{HS} \times (h_6 - h_7) \quad (2)$$

3. Expansion device

Setelah refrigeran terkondensasi di kondensor, refrigeran cair tersebut masuk ke katup ekspansi dimana akan mengontrol jumlah refrigeran yang masuk ke evaporator. Ada banyak jenis katup ekspansi, tiga diantaranya adalah pipa kapiler, katup ekspansi otomatis dan katup ekspansi termostatik. Dalam eksperimen saat ini digunakan jenis katup ekspansi termostatik, karena jenis TXV (*thermostatic expansion valve*) adalah satu katup ekspansi yang mempertahankan besarnya panas lanjut pada uap refrigeran di akhir evaporator tetap konstan, apapun kondisi beban di evaporator.



Gambar 2 (a) Proses Aliran TXV eksternal (b) Bentuk Penampang Katup ekspansi TXV eksternal

Bekerjanya katup ekspansi eksternal diatur sedemikian rupa agar membuka dan menutupnya katup tersebut sesuai dengan temperatur evaporator atau tekanan di dalam sistem. Ketika refrigeran melewati evaporator, tekanan saluran hisap naik dan tekanan ini mendorong diafragma. Jika tekanan dalam bola thermal turun sama dengan kenaikan tekanan dalam saluran hisap, pegas akan menutup katup. Apabila katup tertutup, refrigeran tidak mengalir ke evaporator, tekanan saluran masuk turun dan suhu naik. Turunnya tekanan mengurangi kenaikan equalizer pada diafragma. Bersamaan dengan tekanan bola thermal naik karena suhu saluran masuk naik. Hal ini membuat diafragma melengkung ke bawah dan membuka katup sehingga refrigeran lebih banyak masuk ke evaporator.

4. Evaporator

Pada evaporator, refrigeran menyerap kalor dari produk yang didinginkan. Penyerapan kalor ini menyebabkan refrigeran mendidih dan berubah wujud dari cair menjadi uap (kalor / panas laten). Panas yang dipindahkan berupa :

1. Panas sensibel (perubahan temperatur)

Temperatur refrigeran yang memasuki evaporator dari katup ekspansi harus sampai temperatur jenuh penguapan (*evaporator saturation temperature*). Setelah terjadi penguapan, temperatur uap yang meninggalkan evaporator harus pula dinaikkan untuk mendapatkan kondisi uap panas lanjut (*super heated vapor*).

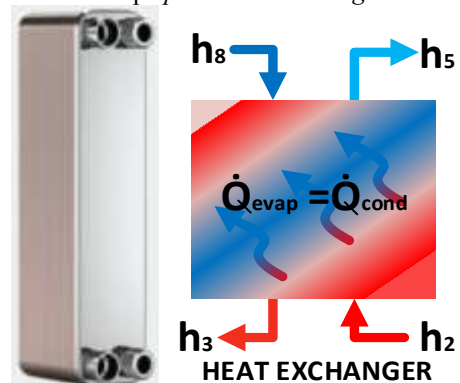
2. Panas laten (perubahan wujud)

Perpindahan panas terjadi penguapan pada refrigeran. Untuk terjadinya perubahan wujud, diperlukan panas laten. Dalam hal ini perubahan wujud tersebut adalah dari cair menjadi uap atau menguap (evaporasi). Refrigeran akan menyerap panas dari ruang sekelilingnya.

Adanya proses perpindahan panas pada evaporator dapat menyebabkan perubahan wujud dari cair menjadi uap. Kapasitas evaporator adalah kemampuan evaporator untuk menyerap panas dalam periode waktu tertentu dan sangat ditentukan oleh perbedaan temperatur evaporator (*evaporator temperature difference*). Kemampuan memindahkan panas dan konstruksi evaporator (ketebalan, panjang dan sirip) akan sangat mempengaruhi kapasitas evaporator. Alat penukar panas yang digunakan sebagai evaporator pada *low stage* tipenya *compact heat exchanger*.

$$Q_{\text{evap}} = \dot{m} \times (h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) = \dot{m}_{\text{LS}} \times (h_1 - h_4) \quad (3)$$

5. Intermediate tipe plate heat exchanger



Gambar 3 Plate heat exchanger (kiri) dan sketsanya (kanan)

Intermediate tipe plate (Plat) ini menggunakan plat tipis sebagai komponen utamanya. Plat yang digunakan dapat berbentuk polos ataupun bergelombang sesuai dengan desain yang dikembangkan. *Intermediate* jenis ini tidak cocok untuk digunakan pada tekanan fluida kerja yang tinggi, dan juga pada diferensial temperatur fluida yang tinggi pula. Jenis *intermediate* yang digunakan pada eksperimen kali ini yaitu tipe plat. *Intermediate* tipe ini termasuk yang banyak digunakan pada dunia industri, bisa digunakan sebagai pendingin air, pendingin oli, dan sebagainya. Prinsip kerjanya adalah aliran dua atau lebih fluida kerja diatur oleh adanya gasket-gasket yang didesain sedemikian rupa sehingga masing-masing fluida kerja dapat mengalir di plat-plat yang berbeda. Saluran setiap plat didesain sedemikian rupa sehingga refrigeran akan terbagi ke setiap bagian plat. Plat ini merupakan pembatas sekaligus ruang area perpindahan panas antara refrigeran *low stage* dan *high stage*. Plat yang tersusun membentuk berderet menghasilkan susunan batasan saluran bagian antara *low stage* dan *high stage* secara berurutan. Maka dapat digunakan kesetimbangan energi di bawah ini.

$$Q_{\text{kondensor}} = Q_{\text{evaporator HS}} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{\text{LS}} \times (h_2 - h_3) = \dot{m}_{\text{HS}} \times (h_5 - h_8) \quad (5)$$

C. Coefficient Of Performance (COP) Sistem Cascade

Coefficient of performance dari sebuah sistem refrigerasi merupakan efisiensi sistem atau rasio ketetapan dari perbandingan kalor yang diserap sebagai energi yang

termafaatkan dengan energi yang digunakan sebagai kerja, atau berdasarkan teori sederhananya ditulis:

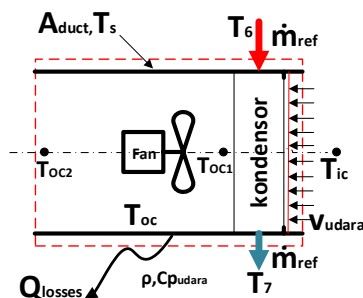
$$\text{COP} = \frac{\text{Energi termanfaatkan}}{\text{Energi yang digunakan sebagai kerja}} \quad (6)$$

Secara aktualnya pada sistem pendingin yaitu perbandingan antara efek refrigerasi dengan kerja dari kompresor atau:

$$\text{COP}_{\text{refrigerasi}} = \frac{\text{efek refrigerasi}}{\text{Kerja kompresor}} = \frac{\dot{Q}_e}{W_c} \quad (7)$$

D. LAJU ALIRAN MASSA REFRIGERAN HIGH STAGE

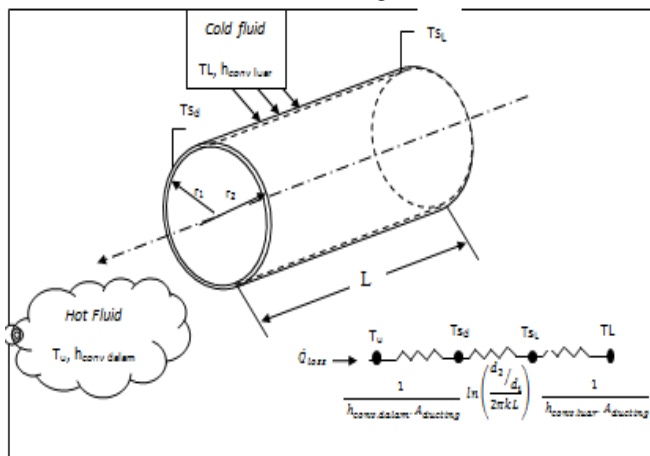
Laju aliran massa refrigeran dapat dihitung dengan persamaan kesetimbangan energi yang terjadi pada kondensor *high stage*.



Gambar 4 Balance energy pada ducting dan kondensor HS

Laju aliran massa refrigeran dapat dihitung dengan persamaan kesetimbangan energi yang terjadi pada kondensor *high stage*. Setelah mendapatkan laju aliran massa udara yang melewati kondensor *high stage*, selanjutnya dihitung besarnya *losses* pengeluaran kalor yang terjadi pada permukaan pipa ducting dengan persamaan sebagai berikut :

Gambar 5 Resistansi Thermal Pada Ducting



$$\dot{Q}_{\text{loss}} = \frac{T_u - T_L}{\sum R_{\text{tot}}} \quad (8)$$

Dimana berdasarkan gambar 5 diatas,

$$\sum R_{\text{tot}} = \frac{1}{h.A} + \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{h.A} \quad (9)$$

didapatkan nilai h (koefisien konveksi) dengan persamaan berikut :

$$h = \frac{Nu_D K_f}{D} \quad (10)$$

Sedangkan untuk nilai h (koefisien konveksi) di luar ducting dengan mencari nilai properties yang dibutuhkan terlebih dahulu. Untuk *isothermal cylinder*, Morgan menyarankan penggunaan persamaan dari:

$$\overline{h} = \frac{k}{D} \overline{Nu}_D \quad (11)$$

Laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage* dengan asumsi panas yang dikeluarkan oleh \dot{m}_{ref} dan yang diterima oleh \dot{m}_{udara} pada kondensor *high stage* adalah sama. Maka persamaan akan menjadi sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{Q}_{\text{udara}} + \dot{Q}_{\text{fan}} + \dot{Q}_{\text{loss}} \quad (12)$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Peralatan Yang Digunakan

Peralatan yang digunakan pada studi eksperimen ini adalah sistem refrigerasi bertingkat dengan MC22 pada HS dan R407F pada LS sebagai fluida kerjanya.

B. Alat Ukur

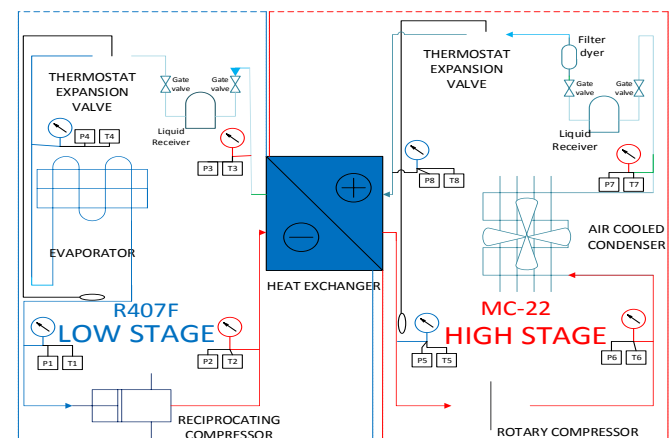
Alat ukur yang digunakan dalam studi eksperimen ini adalah sebagai berikut :

1. Thermocontrol dan thermocouple
2. Pressure gauge
3. Ampere meter dan cosphimeter
4. Volt meter
5. Anemometer

C. Prinsip Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mengosongkan box pendingin, kemudian menghidupkan kompresor HS dan LS sampai kondisi *steady state* lalu mengatur variasi laju pengeluaran kalor pada kondensor dengan mengatur kecepatan aliran udara yang melalui kondensor yaitu 0,7 m/s, 1,7 m/s, 2 m/s, 2,4 m/s, dan 2,8 m/s.

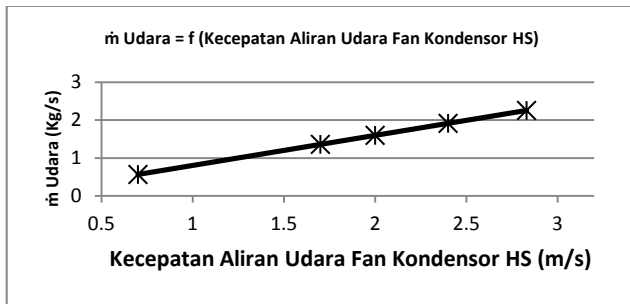
D. Skema Peralatan



Gambar 6 Skema peralatan sistem pendingin cascade

Pengukuran pada setiap titik yaitu dari titik 1 sampai titik 8 dilakukan pengukuran tekanan dan temperature pada sistem refrigerasi *cascade*. Kemudian pengukuran arus, tegangan, cosphi pada kompresor *high stage* dan *low stage*. Gambar 6 merupakan skema siklus refrigerasi *cascade*.

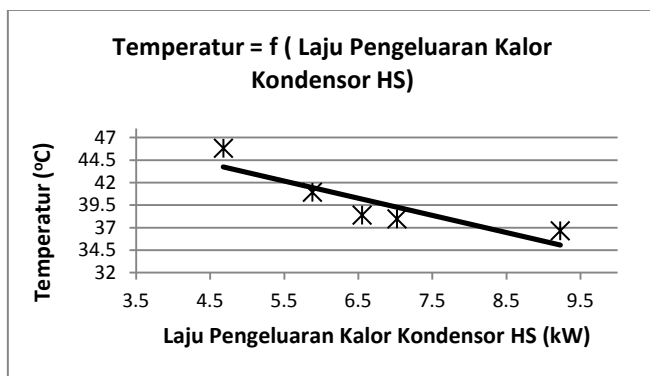
IV. HASIL DAN ANALISA

Gambar 7 Grafik pengaruh kecepatan aliran udara *fan* kondensor HS terhadap \dot{m}_{udara}

Pada grafik di atas terlihat bahwa grafik memiliki tren yang semakin naik, nilai \dot{m}_{udara} naik seiring dengan bertambah besarnya laju aliran udara pada kondensor *high stage*. Hal ini sesuai dengan teori yang telah dipelajari. Bila ditinjau dari sisi perumusan, kita dapat menggunakan persamaan-persamaan berikut ini :

$$\dot{m}_{\text{udara}} = v_{\text{udara}} \times A_{\text{udara}} \times \rho_{\text{udara}} \quad (13)$$

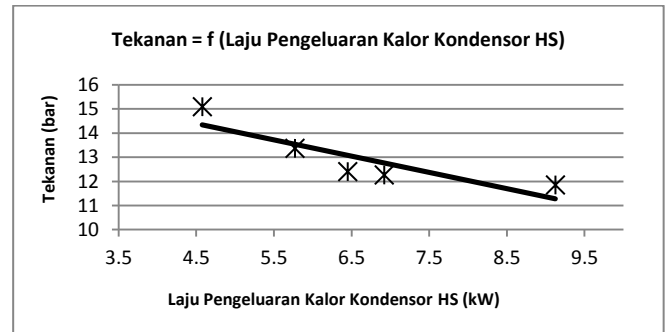
Dari persamaan di atas ketika laju aliran udara kondensor *high stage* semakin besar nilai luasan dan massa jenis udara yang relatif konstan maka akan menyebabkan nilai \dot{m}_{udara} semakin besar karena berbanding lurus.



Gambar 8 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor terhadap temperatur kondensor HS

Pada grafik di atas terlihat bahwa grafik temperatur memiliki tren yang cenderung turun, nilai temperatur kondensasi refrigeran HS semakin kecil seiring dengan kenaikan laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage*. Hal ini sesuai dengan teori yang telah dipelajari.

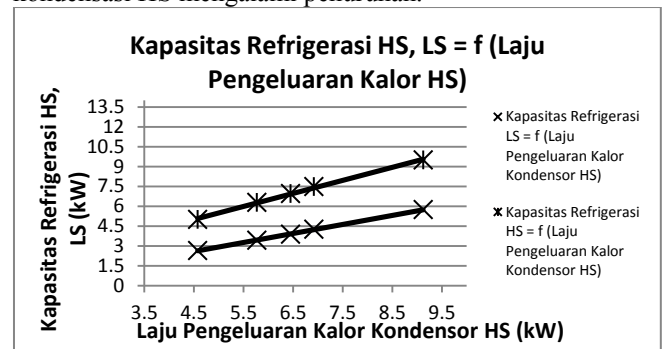
Ketika nilai laju pengeluaran kalor pada kondensor HS bertambah besar, maka mengakibatkan kalor yang dikeluarkan oleh kondensor semakin banyak. Sehingga temperatur kondensor HS mengalami penurunan, seperti terlihat pada grafi di atas.



Gambar 9 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor terhadap tekanan kondensor HS

Pada grafik di atas terlihat bahwa grafik tekanan memiliki tren yang cenderung turun, nilai tekanan kondensasi refrigeran HS semakin kecil seiring dengan kenaikan laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage*. Karena tekanan berbanding lurus dengan temperatur, maka tekanan kondensor HS akan menurun seiring dengan turunnya temperatur.

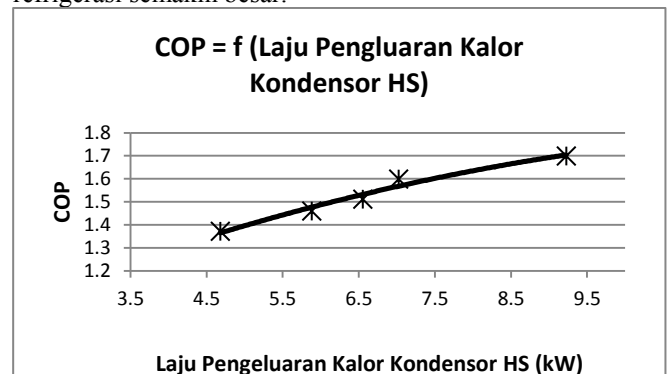
Ketika nilai laju pengeluaran kalor pada kondensor HS bertambah besar, maka mengakibatkan kalor yang dikeluarkan oleh kondensor semakin banyak. Sehingga tekanan yang berbanding lurus dengan temperatur kondensasi HS mengalami penurunan.



Gambar 10 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor pada kondensor HS terhadap kapasitas refrigerasi HS,LS

$$Q_{\text{evap}} = \dot{m}_{\text{LS}} \times (h_1 - h_4) \quad (14)$$

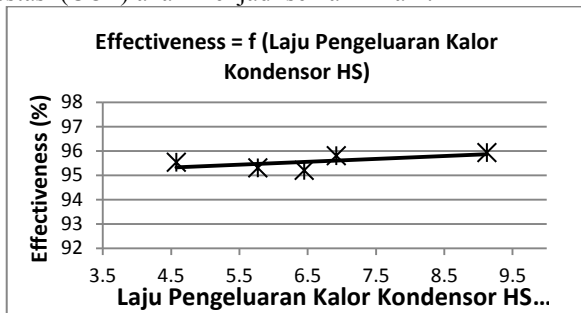
Ketika laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage* semakin besar, maka banyak kalor yang dibuang ke lingkungan. Sehingga menyebabkan temperatur kondensor semakin kecil. Temperatur kondensor yang turun akan menyebabkan nilai efek refrigerasi dan nilai kapasitas refrigerasi semakin besar.



Gambar 11 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor kondensor HS terhadap COP

Pada grafik terlihat tren yang cenderung semakin naik, nilai COP sistem *cascade* semakin besar seiring dengan naiknya laju pengeluaran kalor pada kondensor *high stage*. Koefisien prestasi adalah bentuk penilaian dari suatu mesin refrigerasi. Semakin besar koefisien prestasi, maka semakin baik kerja suatu mesin pendingin.

Nilai koefisien prestasi yang semakin besar menunjukkan bahwa kerja mesin tersebut semakin baik. Besarnya COP dipengaruhi oleh efek refrigerasi dan kerja kompresi. Kenaikan kecepatan udara pendingin kondensor menyebabkan efek refrigerasi meningkat, sedangkan kerja kompresi mengalami penurunan sehingga nilai koefisien prestasi (COP) akan menjadi semakin naik.



Gambar 12 Grafik pengaruh laju pengeluaran kalor kondensor HS terhadap effectiveness

Pada grafik diatas terlihat tren yang cenderung semakin naik. Nilai effectiveness semakin besar seiring meningkatnya laju pengeluaran kalor kondensor. Bila ditinjau dari sisi perumusan, kita dapat menggunakan persamaan-persamaan berikut ini :

$$\varepsilon = \frac{q_{actual}}{q_{maks}} = \frac{Ch (Th,i - Th,o)}{C_{min}(Th,i - Tc,i)} \quad (15)$$

Nilai effectiveness alat penukar panas *plate heat exchanger* akan semakin naik seiring dengan naiknya laju pengeluaran kalor kondensor HS. Hal ini diakibatkan karena semakin besar laju pengeluaran kalor kondensor maka semakin meningkatnya laju aliran massa refrigeran dan kemampuan mendinginkan pada alat penukar panas *plate heat exchanger* akan semakin besar. Nilai q maks naik secara konstan sedangkan q aktual naik secara signifikan. Kenaikan q aktual yang signifikan terjadi karena seiring dengan naiknya laju alir massa refrigeran dan selisih suhu Th_i dikurangi dengan Th_o lebih besar dibandingkan dengan selisih suhu Th_i dikurangi dengan Tc_i .

V. KESIMPULAN

Dari performansi pengujian sistem refrigrasi *cascade* yang telah dilakukan, juga studi dan pembahasan terhadap data yang didapatkan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan performansi sistem yang dilakukan temperature dan tekanan kondensor HS semakin kecil dengan bertambahnya kecepatan laju pengeluaran kalor kondensor HS yang mengakibatkan nilai kapasitas refrigerasi dan COP sistem semakin naik. Dengan turunnya temperatur kondensor HS maka *heat rejection ratio* (HRR) sistem cascade akan semakin turun. Dimana saat variasi kecepatan *fan* tertinggi 2,8 m/s, HRR sistem sebesar 1.58.
2. Nilai *Coefficient of Performance* atau koefisien prestasi dengan performansi yang dilakukan memiliki nilai

semakin besar seiring bertambahnya laju pengeluaran kalor kondensor HS dengan nilai 1.37; 1.4 ; 1.5; 1.60; 1.73.

3. Nilai kapasitas refrigerasi *high stage* maupun *low stage* memiliki nilai yang semakin besar seiring dengan bertambahnya laju pengeluaran kalor kondensor HS dengan nilai tertinggi sebesar 5.75 kW pada LS dan 9.53 kW pada HS.
4. Nilai *effectiveness* dari *intermediate* tipe *plate heat exchanger* (PHE) semakin naik seiring dengan bertambahnya laju pengeluaran kalor kondensor HS. Nilai *effectiveness* terbesar adalah 95.93 % pada saat kecepatan *fan* tertinggi 2.8 m/s.
5. Dengan performansi sistem yang dilakukan temperatur kabin yang dapat dihasilkan semakin besar seiring dengan bertambahnya laju pengeluaran kalor kondensor HS. Nilai temperatur kabin tertinggi adalah -35.22°C pada saat kecepatan *fan* tertinggi 2.8 m/s.
6. Dengan performansi sistem yang dilakukan temperatur evaporasi yang dapat dihasilkan semakin besar seiring dengan bertambahnya laju pengeluaran kalor kondensor HS. Nilai temperatur evaporasi tertinggi adalah -42.84°C pada saat kecepatan *fan* tertinggi 2.8 m/s.

NOMENKLATUR

W_c = Daya kompresor (watt)

\dot{m} = Laju aliran massa refrigeran (kg/s)

h_1 = Entalpi refrigeran masuk kompresor *low stage* (kJ/kg)

h_2 = Entalpi refrigeran keluar kompresor *low stage* (kJ/kg)

Q_{cond} = Laju pengeluaran kalor kondensor (kW)

\dot{m}_{HS} = Laju aliran massa refrigeran *high stage* (kg/s)

\dot{m}_{LS} = Laju aliran massa refrigeran *high stage* (kg/s)

h_7 = Entalpi refrigeran keluar kondensor *high stage* (kJ/kg)

h_6 = Entalpi refrigeran masuk kondensor *high stage* (kJ/kg)

Q_{evap} = Kapasitas pendinginan (kW)

\dot{m}_{ref} = Laju aliran massa refrigeran (kg/s)

h_4 = Entalpi refrigeran masuk evaporator (kJ/kg)

h_1 = Entalpi refrigeran keluar evaporator (kJ/kg)

W_{total} = Daya total kompresor *high stage* dan *low stage* (watt)

Q_{evap} = Energi panas yang diterima udara (kW)

Q_{loss} = Energi panas yang diterima permukaan ducting (kW)

\dot{m}_{udara} = Laju aliran massa udara melewati kondensor *high stage* (kg/s)

Cp_{udara} = Kalor spesifik dari udara (kJ/kg.K)

T_{oc} = Temperatur udara keluar kondensor (°C)

T_{ic} = Temperatur udara masuk kondensor (°C)

T_s = Temperatur permukaan ducting (°C)

v_{udara} = kecepatan udara melewati kondensor *high stage* (m/s)

A_{duct} = Luas penampang ducting kondensor *high stage* (m²)

ρ_{udara} = Massa jenis udara (kg/m³)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Subrida, Faberto. 2013. **Studi Variasi Laju Pengeluaran Kalor Kondensor *High Stage* Sistem Refrigerasi *Cascade* Menggunakan Refrigeran Mc22 Dan R404a Dengan *Heat Exchanger* Tipe *Concentric Tube***. Surabaya :Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [2] Gumilar, Ismu. 2012. **Studi Eksperimetal Dengan Variasi Laju Pelepasan Kalor Pada Kondensor *High Stage* Terhadap Unjuk Kerja Sistem Refrigerasi *Cascade***. Surabaya :Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [3] P.Incropera, Frank., P.Dewitt, David., L.Bergman, Theodore., S.Lavine, Adrienne. 2007. **Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition**. Asia : John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- [4] Trott, A. R., and Welch, T. 2000. **Refrigeration and Air-Conditioning**. Great Britain :Butterworth-Heinemann